

# Capacitive liquid level sensor with integrated pollutant film detection

Publication number: DE19757190

Publication date: 1999-06-24

Inventor: BYATT ANTHONY (CH); CHRISTEN THOMAS (CH);  
KLEINER THOMAS (CH); MATTER DANIEL (CH);  
RUEEGG WALTER (CH)

Applicant: ABB RESEARCH LTD (CH)

Classification:

- international: **G01F23/26; G01F23/22**; (IPC1-7): G01F23/26;  
G01R27/26

- european: G01B7/08C; G01F23/26B4; G01F23/26B6

Application number: DE19971057190 19971222

Priority number(s): DE19971057190 19971222

Also published as:

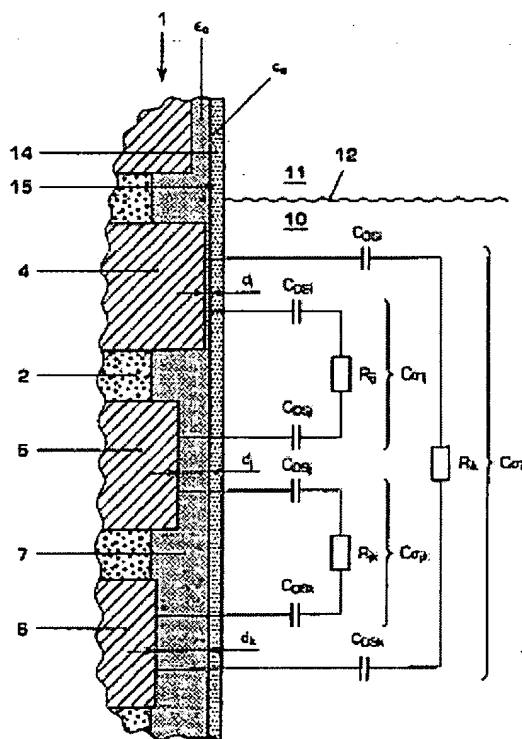
EP0926475 (A2)  
US6073488 (A1)  
EP0926475 (A3)

Report a data error here

Abstract not available for DE19757190

Abstract of corresponding document: **US6073488**

The subject matter of the present invention is a method and a device for capacitive liquid level measurement which are particularly suitable for determining liquid level between adhesive media 10, 11 of different conductivity. The known sensor principle is based on the fact that the environmentally dependent capacitance is measured between neighboring electrodes 13, 4; 4, 5; 5, 6 of a rod-shaped probe 1. According to the invention, the probe 1 has electrodes 4, 5, 6, 13 with covers 7 of different thicknesses  $d_i$ . The effective thickness  $d_s/\epsilon$  of an insulating pollutant film 14 can then be determined by capacitance measurements between at least two pairs of electrodes 4, 5, 6, 13. The influence of a conductive pollutant film 14 on the capacitance signal can be eliminated by selection of at least one suitable measuring frequency. Furthermore, by optimizing the electrode height  $h$ , a large capacitance jump is achieved for a digital liquid level display, and/or a largely continuous increase in capacitance is achieved for an analog liquid level display. The sensor is preferably used to determine the location of an interface 12 between water 10 and oil 11 in a separator tank.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide



71, Anmelder:  
ABB Research Ltd., Zürich, CH

74, Vertreter:  
Lück, G., Dipl.-Ing. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 79761  
Waldshut-Tiengen

72, Erfinder:  
Byatt, Anthony, Dr., Klingnau, CH; Christen,  
Thomas, Dr., Turgi, CH; Kleiner, Thomas,  
Nussbaumen, CH; Matter, Daniel, Dr., Brugg, CH;  
Rüegg, Walter, Dr., Endingen, CH

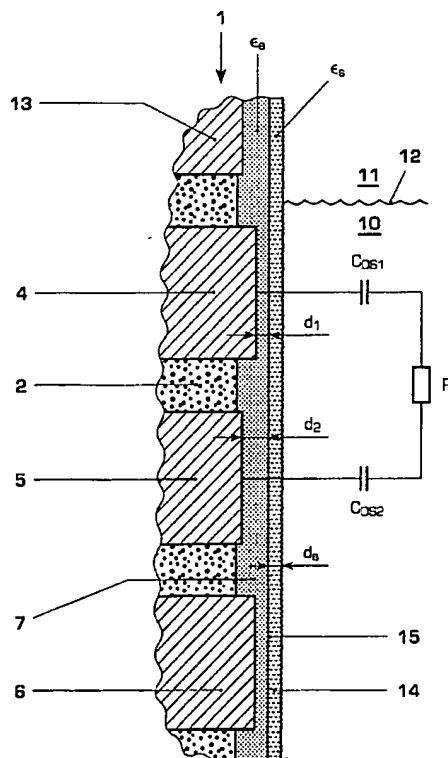
56, Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:

DE 26 45 716 C2  
DE 38 12 687 A1  
DE 32 37 594 A1  
DE 28 19 731 A1  
DE 28 19 731 A1  
DE-OS 23 40 845  
DE 295 05 689 U1  
DD 2 49 966 A1  
US 36 44 821  
EP 00 29 485 A1  
WO 95 04 261 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54, Kapazitiver Füllstandssensor mit integrierter Schmutzfilmdetektion

57, Die vorliegende Erfindung hat einen kapazitiven Füllstandssensor zum Gegenstand, welcher besonders zur Füllstandsbestimmung zwischen adhäsiven Medien 10, 11 unterschiedlicher Leitfähigkeit geeignet ist. Das bekannte Sensorprinzip beruht darauf, daß zwischen benachbarten Elektroden 13, 4; 4, 5; 5, 6 einer stabförmigen Sonde 1 die umgebungsabhängige Kapazität gemessen wird. Erfindungsgemäß weist die Sonde 1 Elektroden 4, 5, 6, 13 mit Abdeckungen 7 unterschiedlicher Dicken  $d_i$  auf. Dann ist die effektive Dicke  $d_s/\epsilon_s$  eines isolierenden Schmutzfilms 14 durch Kapazitätsmessungen zwischen mindestens zwei Paaren von Elektroden 4, 5, 6, 13 bestimmbar. Der Einfluß eines leitfähigen Schmutzfilms 14 auf das Kapazitätssignal ist durch die Wahl mindestens einer geeigneten Meßfrequenz eliminierbar. Ferner wird durch Optimierung der Elektrodenhöhe  $h$  ein großer Kapazitätssprung für eine digitale Füllstandsanzeige und/oder eine weitgehend kontinuierliche Kapazitätzunahme für eine analoge Füllstandsanzeige erzielt. Bevorzugt wird der Sensor zur Ortsbestimmung einer Grenzschicht 12 zwischen Wasser 10 und Öl 11 in einem Separatortank eingesetzt.



## TECHNISCHES GEBIET

Die Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Füllstandsanzeigen. Sie geht aus von einem kapazitiven Füllstandssensor nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

## STAND DER TECHNIK

Im Stand der Technik sind eine Vielzahl von Vorrichtungen zur Bestimmung des Füllstandes eines Behälters bekannt, die auf sehr unterschiedlichen physikalischen Meßprinzipien beruhen. Diese umfassen elektrische (kapazitive oder resistive) und optische Methoden, Radarreflexionsmethoden, Ultraschall-Laufzeitmethoden sowie Gammaabsorptionsmethoden.

Bei der Offshore-Erdölförderung werden sog. Separationstanks eingesetzt, in welchen die bei der Bohrung bzw. Förderung auftretenden verschiedenen Phasen (Sand, Wasser, Öl und Gas) aufgrund ihrer Dichteunterschiede separiert und in getrennten Leitungssystemen abgeführt werden. Es ist dabei sehr wichtig, die Höhe der Trennschicht zwischen Wasser und Öl zu kennen, um am Tank die Ablaßventile für die beiden Medien kontrolliert öffnen und schließen zu können. Hierzu werden zuverlässige Füllstandsmeßgeräte benötigt. Funktioniert ein solches Füllstandsmeßgerät nicht oder nicht richtig, kann z. B. Öl in den Wasserauslaß geraten und große Umweltbelastungen und Kosten verursachen.

Neuerdings werden Hochdruck-Separationstanks entwickelt, die für den Betrieb auf dem Meeresboden einige 100 m unterhalb der Meeresoberfläche geeignet sind. Das geförderte und bereits separierte Öl kann dann mit viel geringerem Energieaufwand an die Meeresoberfläche gepumpt werden. Solche Separatortanks sind sehr hohen Drücken von 60–180 bar, nämlich von außen dem Wasserdruck am Meeresgrund und von innen dem Druck des geförderten Erdöls, sowie hohen Temperaturen von 50–120 °C ausgesetzt. Das Füllstandsmeßsystem muß unter diesen schwierigen Bedingungen jahrelang wartungsfrei und zuverlässig funktionieren, da ein Betriebsausfall und vorzeitiger Ersatz hohe Kosten verursachen würde.

In einer früheren, nicht veröffentlichten deutschen Patentanmeldungen (Aktenzeichen 197 13 267.7) wird als eine Lösung dieses Problems eine kapazitive Meßsonde vorgeschlagen, die sich insbesondere den großen Sprung der Dielektrizitätskonstanten an der Grenzfläche zwischen Öl und Wasser zunutze macht. Die stabförmige, in sich geschlossene Sonde trägt entlang der Achse mehrere ringförmige oder torusförmige, zum Teil in Längsrichtung segmentierte Elektroden. Die Streukapazität zwischen benachbarten Elektroden variiert mit der Dielektrizitätskonstanten des Umgebungsmediums. Die Kapazitätssignale der Elektrodenpaare können einzeln für eine digitale Füllstandsanzeige oder gemittelt für eine analoge Füllstandsanzeige verwendet werden. In beiden Fällen ist die Ortsauflösung durch die Periodizität der Elektrodenanordnung begrenzt. Dazwischliegende Füllstände sind nicht meßbar. Nachteilig ist auch, daß Grenzschichten zwischen Medien gleicher Dielektrizitätskonstanten nicht nachweisbar sind. Alternativ oder ergänzend wird für Medien mit unterschiedlicher Leitfähigkeit vorgeschlagen, zur Ortung der Grenzschicht die ohmschen Entladeströme der Elektrodenpaar-Kapazitäten zu messen. Hierfür ist eine Meßfrequenz so niedrig zu wählen, daß in beiden Medien der ohmsche gegenüber dem kapazitiven Strom dominant ist. Auswirkungen der Leitfähigkeit der Medien auf die Geometrie und Größe der effektiv wirksamen Elektrodenpaar-Kapazitäten bleiben jedoch außer Be-

tracht.

Die Verschmutzung der Meßsonde durch die zu messenden Medien stellt ein großes Problem für die Meßgenauigkeit und Zuverlässigkeit derartiger Füllstandssensoren dar. Beispielsweise kann ein leitfähiger Wasserfilm die Detektion eines Ölmediums und ein nichtleitender Ölbelag die Detektion eines Wassermediums stören oder verunmöglichen. In der oben genannten Patentanmeldung wird vorgeschlagen, die Sonde speziell für Meßungen im Nah- und Fernbereich auszulegen: die Streukapazitäten sind ein Maß für den Nahbereich der Meßsonde, wenn die Elektroden großflächig und/oder weit beabstandet sind, und ein Maß für den Fernbereich, wenn die Elektroden kleinflächig und/oder nah beabstandet sind. Nachteilig ist jedoch, daß die optimale Elektrodengeometrie nur im Hinblick auf die Reichweite der Streufelder in dielektrischen Medien und zudem nur qualitativ angegeben wird. Der Fernbereich ist schließlich auch durch Kapazitätsmessungen zwischen der Sonde und einer zusätzlichen Gegenelektrode, z. B. der Behälterwand, gut erfaßbar. Ferner kann der Nahbereich in leitfähigen Medien aufgrund des Skineffekts gemessen werden. Für Eindringtiefen im mm-Bereich sind aber höchste Frequenzen, im Fall von Wasser beispielsweise 10 GHz und darüber, erforderlich.

In der DE 28 19 731 wird ein kapazitiver Sensor offenbart, der zur Grenzwertüberwachung eines adhäsiven, leitfähigen Mediums dient. Die Kapazitätsmessung erfolgt zwischen einer stabförmigen Sonde und der Behälterwand. Durch leitfähige Ablagerungen auf der Sonde und der Wand können Fehlerströme verursacht werden, die von einer Schirmelektrode entlang der Sondenachse erfaßt werden. Die Fehlerströme können auch durch möglichst hohe Meßfrequenzen klein gehalten werden. Ein Nachteil dieser Anordnung besteht darin, daß die Füllstandshöhe nicht kontinuierlich meßbar ist.

Die DE 38 12 687 A1 zeigt einen kapazitiven Sensor zur gleichzeitigen Bestimmung des Füllstands und des Wassergehalts einer zumindest schwach leitfähigen Flüssigkeit. Hierfür werden zwei koaxial angeordnete Elektroden in das Medium getaucht und bei mindestens zwei Frequenzen die komplexe Impedanz gemessen. Der kapazitive Blindwiderstand ist ein Maß für den Füllstand und der ohmsche Widerstand ein Maß für die Leitfähigkeit des Mediums.

Bei keinem der genannten Sensoren wird berücksichtigt, daß die Kapazitätsmessung in leitfähigen Medien durch ionischen Ladungstransport beeinflusst wird, woraus sich neue Möglichkeiten zur Eliminierung der störenden Einflüsse isolierender und leitfähiger Schmutzbeläge ergeben. Darüberhinaus können neue Bedingungen zur Optimierung der Elektrodengeometrie angegeben werden.

## DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, einen kapazitiven Füllstandssensor mit reduzierter Störungsanfälligkeit bei Verschmutzung anzugeben. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

Kern der Erfindung ist es nämlich, eine stabförmige Sonde mit mehreren, entlang der Sondenachse angeordneten Elektroden auszurüsten, wobei die Elektroden elektrisch isolierende Abdeckungen mit unterschiedlichen Dicken aufweisen.

Ein erstes Ausführungsbeispiel zeigt eine Meßsonde, bei welcher durch radiale Versetzung der Elektroden unterschiedliche Abdeckungsdicken realisiert sind, wodurch isolierende Schmutzfilme auf der Sonde detektierbar und ihr Einfluß auf das Kapazitätssignal eliminierbar sind.

In einem zweiten Ausführungsbeispiel wird gezeigt, wie

mit geeigneten Meßfrequenzen leitfähige Schmutzfilme auf der Sonde detektierbar und ihr Einfluß auf das Kapazitätssignal eliminierbar sind.

Ein drittes Ausführungsbeispiel zeigt eine Meßsonde, bei welcher durch Optimierung der Elektrodenhöhe die Kapazität zwischen benachbarten Elektroden für leitfähige Medien groß und für isolierende Medien klein gewählt ist.

Ein viertes Ausführungsbeispiel stellt eine Variante dar, bei welcher die Elektrodenhöhe möglichst groß gewählt ist, um einen weitgehend kontinuierlichen Meßbereich zu realisieren.

Zusätzliche Ausführungsbeispiele ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen und aus Kombinationen erfindungswesentlicher Merkmale.

Wichtige Vorteile des erfindungsgemäßen kapazitiven Füllstandssensors betreffen die verbesserte Zuverlässigkeit bei der Füllstandsbestimmung adhäsiver Medien, die hohe Meßgenauigkeit über einen großen Meßbereich und die Möglichkeit einer digitalen oder analogen Füllstandsanzeige.

Ein weiterer bedeutender Vorteil besteht darin, daß sämtliche Maßnahmen, durch welche die Störeinflüsse durch isolierende und leitfähige Schmutzfilme minimiert sowie die Kapazitätssignale und der Meßbereich maximiert werden, miteinander gut kompatibel sind.

Desweiteren vorteilhaft sind der einfache, robuste Aufbau ohne bewegliche Teile, die weitgehende Wartungsfreiheit und die hervorragende Eignung der Meßsonde zur Detektion einer Grenzschicht zwischen Wasser und Öl.

### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen erläutert. Es zeigen:

**Fig. 1** eine kapazitive Meßsonde mit mehreren übereinander angeordneten Elektroden und rundem oder quadratischem Querschnitt (Stand der Technik);

**Fig. 2** eine Detailansicht einer verschmutzungsfreien Meßsonde gemäß **Fig. 1** mit Ersatzschaltbildern für die Impedanz zwischen einem Elektrodenpaar;

**Fig. 3** eine Detailansicht einer Meßsonde mit (a) alternierend und (b) beliebig radial versetzten Elektroden zur Detektion eines isolierenden Schmutzfilms und zugehörigem Ersatzschaltbild für die Impedanz zwischen einem Elektrodenpaar;

**Fig. 4** eine Detailansicht einer Meßsonde mit einem leitfähigen Schmutzfilm und zugehörigem Ersatzschaltbild für die Impedanz zwischen einem Elektrodenpaar;

**Fig. 5** ein Elektrodenpaar-Kapazitätsverhältnis  $C_0/C_e$  für ein leitfähiges relativ zu einem isolierenden Medium als Funktion der Elektrodenhöhe  $h$  für eine Meßsonde gemäß **Fig. 2**;

**Fig. 6** eine Elektrodenpaar-Kapazität  $C$  als Funktion einer Füllstandshöhe  $z$  für zwei Dicken  $d_e$  der Elektrodenabdeckung für eine Meßsonde gemäß **Fig. 2**.

In den Figuren sind gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

### WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

Die Erfindung hat einen kapazitiven Füllstandssensor zum Gegenstand, welcher besonders zur Füllstandsbestimmung adhäsiver Medien, beispielsweise zur Ortsbestimmung einer Grenzschicht 12 zwischen Wasser 10 und Öl 11 in einem Separatortank, geeignet ist. **Fig. 1** zeigt ausschnittsweise (a) eine Seitenansicht eines erfindungsgemäßen Füllstandssensors und (b), (c) Ausführungsbeispiele für einen runden und rechteckigen Sensorquerschnitt. Der kapazi-

zitive Füllstandssensor umfaßt eine stabförmige Sonde 1 mit mehreren, entlang einer Sondenachse B angeordneten Elektroden 4, 5, 6, 13, die über Meßleitungen 8 mit einer nicht dargestellten Meßelektronik verbunden sind. Die prinzipielle Funktionsweise beruht darauf, daß zwischen benachbarten Elektroden 13, 4; 4, 5; 5, 6 die Kapazitätsänderung gemessen wird, welche durch eine Verschiebung einer Grenzschicht 12 zwischen einem leitfähigen 10 und einem isolierenden Medium 11 verursacht wird. Gemäß **Fig. 1a** besteht die Meßsonde 1 im wesentlichen aus einem zylindrischen, elektrisch isolierenden Rohr 2, an dessen äußerer Mantelfläche 2b die Elektroden 4, 5, 6, 13 aufgebracht sind. Das Rohrinne 3 ist gegenüber dem die Sonde 1 umgebenden Außenraum abgeschlossen. Vorzugsweise sind die Elektroden 4, 5, 6, 13 mit einer elektrisch isolierenden, dünnen Abdeckung 7 versehen, welche die Elektroden 4, 5, 6, 13 gegen mechanische und/oder chemische Umwelteinflüsse schützt. Die Sonde 1 kann einen beliebigen Querschnitt aufweisen. Bevorzugt ist das Rohr 2 kreiszylindrisch und sind die Elektroden 4, 5, 6, 13 ringförmig (**Fig. 1b**). Es können auch segmentförmige (**Fig. 1c**) Elektroden 5a, 5b zu einer einzigen Elektrode 5 zusammengeschlossen sein.

Zur Analyse der Elektrodengeometrie und für ihre Ausgestaltung zur Detektion störender Schmutzfilme wird in der Erfindung von der wesentlichen Erkenntnis ausgegangen, daß der Sprung der Leitfähigkeit an der Grenzschicht 12 in erster Linie die Feldlinienverteilung der beteiligten Kapazitäten und damit die Gesamtkapazität zwischen benachbarten Elektroden, d. h. die Elektrodenpaar-Kapazität  $C$ , ändert.

**Fig. 2** stellt eine Detailansicht der Meßsonde 1 mit einem erfindungsgemäß modellierten Ersatzschaltbild für die komplexe Gesamtkapazität zwischen den Elektroden 4 und 5 dar. Im isolierenden Medium 11 ist die Streukapazität  $C_e$  dominant, welche durch die Geometrie der Elektroden 4, 5 und die Dielektrizitätskonstante des Mediums 11 und des Stabmaterials gegeben ist und im konkreten Fall mit einem Finite-Elemente-Programm berechnet wird. In einem leitfähigen Medium 10 ist hingegen eine einfache analytische Darstellung möglich. In unmittelbarer Nachbarschaft zu den Elektroden 4, 5 werden Ladungsträger induziert und sehr große Doppelschichtkapazitäten  $C_{DS}$  gebildet, welche über den Widerstand  $R$  des Mediums 10 miteinander verbunden sind und eine komplexe Gesamtkapazität

$$C_0 = C_{DS} / [2 \cdot (1 + i \cdot \omega \cdot \tau)] \quad (G1)$$

bilden. Hierbei bezeichnet  $i$  = imaginäre Einheit,  $\omega = 2\pi \cdot f$ ,  $f$  = Frequenz der Kapazitätsmessung und  $\tau = RC$ -Zeitkonstante der Doppelschichtkapazität bzw. dielektrische Relaxationszeit des RC-Kreises.

Die Doppelschichtkapazität lautet

$$C_{DS} = \epsilon_e \cdot \epsilon_0 \cdot A / d_e, \quad (G2)$$

wobei  $\epsilon_e$  = Dielektrizitätskonstante und  $d_e$  = Dicke der dielektrischen Elektrodenabdeckung 7,  $\epsilon_0$  = Influenzkonstante und  $A$  = Doppelschicht-Kondensatorfläche = Fläche der zugehörigen Elektrode (4, 5, 6, 13 inklusive Abdeckung 7).  $C_{DS}$  ist somit durch die effektive Dicke  $d_e/\epsilon_e$  der Elektrodenabdeckung 7 und die Fläche der Elektrode 4, 5, 6, 13 gegeben, ist aber unabhängig von der Dielektrizitätskonstanten des leitfähigen Mediums 10.

Die dielektrische Relaxationszeit  $T$  ist ein Maß für die Geschwindigkeit, mit welcher die Doppelschichtkapazität geladen bzw. gebildet wird. Man kann  $\tau$  in der Form

$$\tau = R \cdot C_{DS} / 2 = \tau_0 \cdot K = \epsilon_e \cdot \epsilon_0 \cdot \rho_M \cdot K \quad \text{mit} \quad (G3)$$

$$K = (A/A_1) \cdot (h/d_e) \quad (G3')$$

schreiben, wobei  $\rho_M$  = spezifischer Widerstand des Mediums 10,  $K$  = dimensionsloser Geometriefaktor,  $A_1$  = effektive stromdurchflossene Fläche und  $h$  = Elektrodenhöhe. Typische Werte des Geometriefaktors sind  $1 < K < 100$ .

Ein Ziel der Erfindung ist es, auch bei Anwesenheit eines elektrisch isolierenden oder leitfähigen Schmutzfilms 14 auf der Staboberfläche 15 eine zuverlässige Kapazitätsmessung bzw. Füllstandsbestimmung zu gewährleisten.

Fig. 3 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer Elektrodenanordnung 4, 5, 6, 13, die besonders zur kapazitiven Füllstandsmessung in Gegenwart eines isolierenden Schmutzfilms 14 beispielsweise aus Öl geeignet ist. Die erfindungsgemäße Idee besteht darin, daß die Sonde 1 Elektroden 4, 5, 6, 13 mit Abdeckungen 7 unterschiedlicher Dicken  $d_i$  aufweist.

Im folgenden seien die Elektroden 4, 5, 6 als die i-te, j-te und k-te Elektrode mit den zugehörigen Abdeckungsdicken  $d_i$ ,  $d_j$  und  $d_k$  und Kondensatorflächen  $A_i$ ,  $A_j$  und  $A_k$  bezeichnet, wobei  $i, j, k = 1, 2, \dots, n$  Indizes zur Durchnummerierung der Elektroden und  $n$  die Gesamtzahl der Elektroden 4, 5, 6, 13 ist. In einem leitfähigen Medium 10 treten im Fall  $d_i \neq d_j$  unterschiedliche Doppelschichtkapazitäten  $C_{DSi} \neq C_{DSj}$  vor der i-ten und j-ten Elektrode 4, 5 auf, die unterschiedlich stark mit der effektiven Dicke  $d_s/\epsilon_s$  des isolierenden Schmutzfilms 14 variieren, wobei  $d_s$  = geometrische Dicke und  $\epsilon_s$  = Dielektrizitätskonstante des Films 14. In Analogie zur Gleichung G2 gilt nämlich für die durch den Film 14 verfälschten Werte der Doppelschichtkapazitäten

$$C_{DSi} = \epsilon_0 \cdot A_i / (d_i/\epsilon_e + d_s/\epsilon_s), \quad (G4)$$

$$C_{DSj} = \epsilon_0 \cdot A_j / (d_j/\epsilon_e + d_s/\epsilon_s). \quad (G5)$$

Daraus ist erfindungsgemäß die effektive Dicke des Films 14

$$d_s/\epsilon_s = (d_i/\epsilon_e) \cdot [(C_{DSj} \cdot d_j \cdot A_i) / (C_{DSi} \cdot d_i \cdot A_j) - 1] / [1 - C_{DSj} \cdot A_i / C_{DSi} \cdot A_j] \quad (G6)$$

bestimmbar, was sich für gleiche Kondensatorflächen  $A_i = A_j = A$  vereinfacht zu

$$d_s/\epsilon_s = (d_i/\epsilon_e) \cdot [(C_{DSj} \cdot d_j) / (C_{DSi} \cdot d_i) - 1] / [1 - C_{DSj} / C_{DSi}]. \quad (G7)$$

Der Quotient der Doppelschichtkapazitäten  $C_{DSj}/C_{DSi}$  in Gleichung G6 oder G7 ist durch Kapazitätsmessungen zwischen mehreren Elektroden 4, 5, 6, 13 bestimmbar. Mit Vorteil weisen benachbarte Elektroden 13, 4; 4, 5; 5, 6 unterschiedliche Dicken  $d_i \neq d_j$  ( $j = i + 1$ ) und übernächst benachbarte Elektroden 13, 5 bzw. 4, 6 gleiche Dicken  $d_i = d_k$  ( $k = i + 2$ ) der Abdeckung 7 auf. Dann sind die in Anwesenheit des Films 14 gemessenen Kapazitätswerte zwischen übernächsten Elektroden 4, 6 bzw. 13, 5 für kleine Frequenzen gleich  $C_{\sigma i} = C_{DSi}/2$  bzw.  $C_{\sigma j} = C_{DSj}/2$  und es gilt

$$C_{DSj}/C_{DSi} = C_{\sigma j}/C_{\sigma i}. \quad (G8)$$

Die minimal detektierbare effektive Dicke  $(d_s/\epsilon_s)_{\min}$  ist durch die relative Meßungenauigkeit  $\Delta$  bei der Bestimmung des Quotienten  $C_{DSj}/C_{DSi}$  gegeben:

$$(d_s/\epsilon_s)_{\min} = (d_i \cdot d_j) / (|d_i - d_j| \cdot \epsilon_e) \cdot \Delta. \quad (G9)$$

Als Beispiel sei  $d_i = 0,5$  mm,  $d_j = 1$  mm,  $\epsilon_e = \epsilon_s$  und  $\Delta = 10\%$  angenommen. Dann beträgt die minimal detektierbare

geometrische Dicke des isolierenden Schmutzfilms 14  $d_s = 0,05$  mm.

Fig. 3b zeigt einen allgemeinen Fall unterschiedlicher Abdeckungsdicken  $d_i \neq d_j \neq d_k$  über den Elektroden 4, 5, 6. Dann gilt

$$C_{DSj}/C_{DSi} = (C_{\sigma ij}^{-1} + C_{\sigma ik}^{-1} - C_{\sigma jk}^{-1}) / (C_{\sigma ij}^{-1} + C_{\sigma jk}^{-1} - C_{\sigma ik}^{-1}), \quad (G10)$$

wobei die  $C_{\sigma ij}^{-1} = C_{DSi}^{-1} + C_{DSj}^{-1}$  usw. die Gesamtkapazitäten bezeichnen, die zwischen der i-ten und j-ten usw. Elektrode ggf. frequenzselektiv meßbar sind.

Die Dicken  $d_i$  der Abdeckung 7 können also beliebig gewählt sein, sofern benachbarte, d. h. zu einer Elektrodenpaar-Kapazität  $C$  gehörige, Elektroden 13, 4; 4, 5; 5, 6 unterschiedliche Dicken  $d_i \neq d_{i+1}$  aufweisen. Unterschiedliche Dicken  $d_i \neq d_{i+1}$  können auch für Elektroden 4, 5, 6, 13 mit gleichem Querschnitt, insbesondere gleichem Radius, realisiert sein, indem die Oberfläche 15 der Sonde 1 stufenförmige, insbesondere ringförmige, Erhöhungen mit unterschiedlichen Stufenhöhen über benachbarten Elektroden 13, 4; 4, 5; 5, 6 aufweist. Dann sind in den Gleichungen G4–G6 die entsprechenden Werte der zugehörigen Kondensatorflächen  $A_i$  und  $A_j$  einzusetzen. Wie aus Fig. 3a ersichtlich sind vorzugsweise die Oberfläche 15 der Sonde 1 kreiszylindrisch, die Elektroden 4, 5, 6, 13 ringförmig, ihre Kondensatorflächen  $A_i = A_j$  gleich, benachbarte Elektroden 13, 4; 4, 5; 5, 6 weisen unterschiedliche Dicken  $d_i \neq d_{i+1}$  und übernächst benachbarte Elektroden 13, 5; 4, 6 gleiche Dicken  $d_i = d_{i+2}$  der Abdeckung 7 auf.

Im Prinzip könnte ein isolierender Schmutzfilm 14 auch dadurch festgestellt werden, daß die Elektrodenpaar-Kapazität  $C_{\sigma}$  in einem leitfähigen Medium 10 gegenüber einem fix vorgegebenen Sollwert absinkt. Ein Vorteil mehrerer unabhängiger Kapazitätsmessungen mit unterschiedlichen Abdeckungsdicken  $d_i \neq d_j$  besteht jedoch darin, daß der isolierende Schmutzfilm 14 auch bei veränderlichen oder verschiedenen Medien 10 mit großer Zuverlässigkeit detektierbar und meßbar ist. Insbesondere fallen bei den Quotientenbildungen in den Gleichungen G8 und G10 multiplikative Meßwertänderungen heraus.

Die mit Hilfe der Gleichungen G6 oder G7 bestimmte effektive Dicke  $d_s/\epsilon_s$  eines dielektrischen Schmutzfilms 14 kann auf verschiedene Weise zur Kontrolle und/oder Korrektur der Füllstandsmessung benutzt werden. Beispielsweise sind unverfälschte Werte der Doppelschichtkapazitäten und der Gesamtkapazität  $C_{\sigma}$  durch rechnerische Eliminierung von  $d_s/\epsilon_s$  in den Gleichungen G4–G6 bestimmbar. Darüberhinaus können geeignete Maßnahmen ergriffen werden, sobald  $d_s/\epsilon_s$  einen vorgebbaren kritischen Wert überschreitet. Diese umfassen insbesondere eine Mengenregelung eines Inhibitorzusatzes zur chemischen Auflösung des Schmutzfilms 14, eine bedarfsmäßige oder periodische Reinigung des Meßstabs 1 mittels eines axial beweglichen Ringes o. ä.

Fig. 4 zeigt ausschnittsweise eine Meßsonde 1, die von einem mehr oder weniger leitfähigen Schmutzfilm 14 der Dicke  $b$  und des spezifischen Widerstands  $\rho_f$  bedeckt und in ein isolierendes Medium 11 eingetaucht ist. Beispielsweise kann der Schmutzfilm 14 aus Wasser oder einer Wasser-Öl-Emulsion bestehen. Einerseits trägt der Film 14 mit zwei Doppelschichtkapazitäten  $C_{DSf}$  gemäß Gleichung G2

$$C_{DSf} = \epsilon_e \cdot \epsilon_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h / de \quad (G11)$$

zur geometrischen Kapazität  $C_e$  im Medium 11 bei, wobei der Einfachheit halber eine ringförmige Elektrode angenommen wurde. Andererseits wirkt der Film 14 als elektrischer

Leiter parallel zu  $C_e$  mit dem Widerstand

$$R_f = h_f \cdot \rho_f / (2 \cdot \pi \cdot r \cdot b), \quad (G12)$$

wobei  $h_f$  eine effektive Länge des Strompfades im leitfähigen Schmutzfilm 14 zwischen zwei Elektroden 4, 5 bezeichnet. Näherungsweise kann  $h_f$  gleich  $a + h/2$  oder gleich  $h$  gesetzt werden. Die charakteristische RC-Zeitkonstante des Films 14

$$\tau_f = R_f \cdot C_{DSf}/2 = \tau_{f0} \cdot G \quad (G13)$$

setzt sich aus einer materialspezifischen Zeitkonstante

$$\tau_{f0} = \epsilon_e \cdot \epsilon_0 \cdot \rho_f \quad (G14)$$

und einem Geometriefaktor

$$G = h \cdot h_f / (2 \cdot d_e \cdot b) \approx h^2 / (2 \cdot d_e \cdot b) \quad (G15)$$

zusammen. Die Relaxationszeit  $\tau_f$  definiert eine charakteristische Frequenz des Schmutzfilms 14

$$f(b) = \tau_f^{-1} = 2 \cdot (\epsilon_e \cdot \epsilon_0 \cdot \rho_f)^{-1} \cdot (d_e/h^2) \cdot b, \quad (G16)$$

die insbesondere von der Dicke  $b$  des leitfähigen Schmutzfilms 14 abhängt. Die gesamte Elektrodenpaar-Kapazität nimmt unterhalb bzw. oberhalb der charakteristischen Frequenz  $f(b)$  asymptotisch die Werte

$$C(f) = C_{DSf}/2 \text{ für } f \ll f(b) \\ = C_e \text{ für } f \gg f(b) \quad (G17)$$

an. Bei tiefen Frequenzen  $f \ll f(b)$  kann der Schmutzfilm 14 ein leitfähiges Medium 10 simulieren, obwohl hinter dem Film 14 ein isolierendes Medium 11 verborgen ist. Bei hohen Frequenzen  $f \gg f(b)$  hingegen erscheint der Schmutzfilm 14 dielektrisch transparent. Folglich ist die Meßfrequenz  $f$  mit Vorteil größer als  $f(b)$  gewählt. Hierzu ein quantitatives Beispiel:  $\rho_f \approx 0,25 \, \Omega\text{m}$  (Salzwasser-Schmutzfilm 14),  $\epsilon_e \approx 3$ ,  $\tau_{f0} \approx 7 \, \text{ps}$ ;  $h \approx h_f \approx 15 \, \text{mm}$ ,  $d_e = 0,5 \, \text{mm}$ ,  $b = 1 \, \text{mm}$ , Geometriefaktor  $G \approx 200 \rightarrow f(b) = 100 \, \text{MHz}$ . Man beachte, daß die Leitfähigkeit des Wassers stark mit dem temperatur- und druckabhängigen Salzgehalt variiert, was durch eine geeignete Frequenzwahl berücksichtigt werden kann. Besteht der Schmutzfilm 14 aus einer Emulsion von Salzwasser der Konzentration  $c$  und Öl der Konzentration  $1 - c$  kann  $\rho_f \approx \rho_{\text{Salzwasser}}^c \cdot \rho_{\text{Öl}}^{1-c}$  approximiert werden und die charakteristische Frequenz  $f(b)$  sinkt entsprechend. Für ein beliebiges Medium 10 der Konzentration  $c$  und Medium 11 der Konzentration  $1 - c$  darf  $\rho_f \approx \rho_1^c \cdot \rho_2^{1-c}$  gesetzt werden.

Im folgenden werden zwei Ausführungsbeispiele angegeben, wie bei veränderlicher Filmdicke  $b$  die Füllstandsmessung auf einfache Weise durchführbar ist. Erstens kann eine maximal zulässige Filmdicke  $b_c$  und eine zugehörige kritische Frequenz  $f_c$  vorgegeben sowie eine Meßfrequenz oberhalb von  $f_c$

$$f > f_c = f(b_c) = 2 \cdot (\epsilon_e \cdot \epsilon_0 \cdot \rho_f)^{-1} \cdot (d_e/h^2) \cdot b_c \quad (G18)$$

gewählt sein. Die Einhaltung einer Filmdicke  $b < b_c$  kann dann beispielsweise dadurch sichergestellt sein, daß bei ungefähr bekannter Verschmutzungsrate entsprechende Reinigungsintervalle festgelegt werden. Zweitens können eine maximal zulässige Filmdicke  $b_c$  und eine zugehörige kritische Frequenz  $f_c$  vorgegeben sowie zwei Meßfrequenzen

$$f_a < f_c = f(b_c) \text{ und } f_b > f_c = f(b_c) \quad (G19)$$

gewählt sein. Bei Annäherung der aktuellen Filmdicke  $b$  an den kritischen Wert  $b_c$  wird dann zunächst der bei niedrigerer Frequenz gemessene Kapazitätswert  $C(f_a)$  absinken und der bei höherer Frequenz gemessene Kapazitätswert  $C(f_b)$  konstant bleiben. Mit Hilfe einer solchen Signalsignatur können wiederum geeignete Maßnahmen, wie z. B. die Zugabe eines Inhibitors oder eine Reinigung des Meßstabs 1, veranlaßt werden.

Ein Vorteil der Überwachung der Schmutzfilmdicken  $d_f/\epsilon_s$  und  $b_c$  besteht in der erhöhten Zuverlässigkeit der Füllstandsmessung, so daß ein wartungsfreier Betrieb über längere Zeiten auch bei kontaminierenden Medien 10, 11 möglich ist. Es ist zudem sehr vorteilhaft, daß die Maßnahmen zur Detektion isolierender und leitfähiger Schmutzfilme 14 problemlos miteinander kompatibel sind.

Ein weiterer Gegenstand der Erfindung ist es, diejenigen Elektrodenanordnungen anzugeben, für welche die Elektrodenpaar-Kapazität  $C_\sigma$  für ein leitfähiges Medium 10 möglichst groß und  $C_e$  für ein isolierendes Medium 11 möglichst klein ist. Für die quantitative Analyse wird der Einfachheit halber angenommen, daß die Elektroden 4, 5, 6, 13 im abgerollten Zustand eine rechteckige Form der Höhe  $h$  und der Länge  $2 \cdot \pi \cdot (r - d_j)$  aufweisen und daher wegen  $d_e \ll r$  die Kondensatorfläche  $A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$  beträgt, wobei  $r$  = Radius der Sonde 1. Gemäß Fig. 2 wird der Elektrodenabstand  $a$  zwischen der Oberkante einer unteren Elektrode 4, 5, 6 und der Unterkante einer oberen Elektrode 13, 4, 5 gemessen.

Fig. 5 zeigt das Ergebnis einer numerischen Simulation des Kapazitätsverhältnisses  $C_\sigma/C_e$  als Funktion der Elektrodenhöhe  $h$  und des Verhältnisses von Elektrodenhöhe zu Elektrodenabstand  $h/a$ . Für die Berechnung wurden die folgenden Annahmen getroffen: Sondenradius  $r = 5 \, \text{cm}$ , konstante Periodizität der Elektrodenanordnung  $a + h = 10 \, \text{cm}$ , Salzwasser als Medium 10 mit  $\epsilon_1 = 64$  und  $\rho_1 = 0,25 \, \Omega\text{m}$  zur Bestimmung von  $C_\sigma$ , Öl als Medium 11 mit  $\epsilon_2 = 2,2$  und  $\rho_2 = 10^{11} \, \Omega\text{m}$  zur Bestimmung von  $C_e$  und  $\epsilon_e \approx \epsilon_2$ . Entgegen der bisherigen Auffassung ist das Kapazitätsverhältnis  $C_\sigma/C_e$  für kleine Elektrodenhöhen  $h$  bzw. große Elektrodenabstände  $a$  klein, obwohl doch das elektrische Streufeld für große  $a$  weiter in die Medien 10, 11 hinragen und besonders sensibel auf Veränderungen der Dielektrizitätskonstanten reagieren sollte. Statt dessen steigt  $C_\sigma/C_e$  mit zunehmender Elektrodenhöhe  $h$  an, erreicht bei ca.  $h = 7,5 \, \text{cm}$  oder  $h/a = 3$  ein Maximum und fällt danach für  $h \rightarrow 10 \, \text{cm}$  steil ab. Der Anstieg ist durch die Zunahme der Elektroden- bzw. Kondensatorfläche  $A$  der Doppelschichtkapazität  $C_{DS}$  in  $C_\sigma$  dominiert, der Abfall hingegen durch die Zunahme von  $C_e$  aufgrund des abnehmenden Elektrodenabstands  $a \rightarrow 0$ . In diesem Ausführungsbeispiel beträgt  $C_\sigma/C_e = 20,7$  für eine symmetrische Anordnung mit Elektrodenhöhe gleich Elektrodenabstand oder  $h/a = 1$ . Insbesondere ist  $C_\sigma/C_e > 20,7$  für  $1 < h/a < 6$  und  $C_\sigma/C_e = 22,2$  ( $C_\sigma = 378 \, \text{pF}$ ,  $Q = 17 \, \text{pF}$ ) maximal für  $h/a = 3$ . Demzufolge ist  $h/a$  für einen hinreichend großen Signalhub  $2 \cdot C_\sigma/C_e$  mit Vorteil zwischen 0,5 und 12, vorzugsweise zwischen 1 und 6, besonders bevorzugt zwischen 1,5 und 4,5, insbesondere gleich 3, gewählt.

Die erfindungsgemäße Optimierung der Elektrodengeometrie umfaßt außer der Wahl einer relativen Elektrodenhöhe  $h/a$  auch die einer absoluten Elektrodenhöhe  $h$  sowie einer maximalen Dicke  $d_e$  und einer Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_e$  der Elektrodenabdeckung 7. In Fig. 6 zeigen die durchgezogenen Linien analytische Berechnungen und die Punkte numerische Berechnungen der Elektrodenpaar-Kapazität  $C$  als Funktion der Füllstandshöhe  $z$  für zwei Dicken  $d_e = 0,3 \, \text{mm}$  und  $d_e = 1,2 \, \text{mm}$  der Elektrodenabdeckung 7.

Die analytische Funktion  $C(z)$  ist erfindungsgemäß durch die Gleichung

$$\begin{aligned} C(z) &= C_e \text{ für } 0 \leq z \leq h + a \\ &= C_e + C_o \cdot z/(z + h) \text{ für } h + a \leq z \leq 2 \cdot h + a \\ &= C_o/2 \text{ für } 2 \cdot h + a \leq z \leq 2 \cdot (h + a) \quad (G20) \end{aligned}$$

approximierbar, wobei der Einfachheit halber  $C_e \ll C_o$  angenommen wurde. Nach Fig. 6 und Gleichung G20 ist die Messung der Elektrodenpaar-Kapazität  $C(z)$  sowohl für eine digitale als auch analoge Anzeige des Ortes  $z$  der Grenzschicht 12 verwendbar.

Zunächst wird die digitale Anzeige anhand des Elektrodenpaares 4, 5 in Fig. 2 diskutiert. Die Kapazität  $C(z)$  ist für  $0 \leq z \leq h + a$  weitgehend konstant. Sie springt von  $C_e$  auf den Wert  $C_o/2$ , wenn die Grenzschicht 12 von  $z = h + a$  bis  $z = 2 \cdot h + a$  steigt, und behält zwischen  $z = 2 \cdot h + a$  und  $z = 2 \cdot (h + a)$  den im wesentlichen konstanten Wert  $C_o/2$  bei. Anschaulich bedeutet dies, daß für  $z < 0$  eine rein geometrische Kapazität  $C_e$  in einem Dielektrikum 11 vorliegt und für  $z > 2 \cdot h + a$  zwei Doppelschichtkapazitäten  $C_{DS}$  an den vollständig in das leitfähige Medium 10 eingetauchten Elektroden 5 und 4. Die numerische Lösung zeigt, daß  $C(z)$  zwischen 0 und  $h + a$  geringfügig ansteigt und im Bereich  $z = h + a$  die Steigung von  $C(z)$  kontinuierlich zunimmt. Beide Lösungen zeigen, daß der bevorzugte Meßbereich im Gebiet des großen Kapazitätsanstiegs zwischen  $h + a$  und  $2 \cdot h + a$  liegt. Daher wird man für einen optimalen Sensorbetrieb bevorzugt diejenige Elektrodenpaar-Kapazität  $C(z)$  auswerten, für welche die untere Elektrode vollständig und die obere Elektrode teilweise in das leitfähige Medium 10 eingetaucht ist.

Ein Vorteil der digitalen Anzeige ist es, daß der Signalhub  $2 \cdot C_o/C_e$  je nach gefordertem Signal-Rausch-Verhältnis und Art der Medien 10, 11 durch eine geeignete Wahl der relativen Elektrodenhöhe  $h/a$  gemäß Fig. 5 angepaßt und insbesondere optimiert werden kann. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß eine für Separatortanks ausreichende und zuverlässige Höhenauflösung  $h + a \approx 5$  cm bis 10 cm erzielbar ist, indem die Periodenlänge  $h + a$  der Elektrodenanordnung 4, 5, 6, 13 entsprechend gewählt ist.

Eine sehr feine Höhenauflösung kann darüberhinaus mit einer analogen Anzeige realisiert werden. Für diesen Zweck ist mit Gleichung G20 aus dem analogen Meßsignal  $C(z)$  im Bereich  $h + a \leq z \leq 2 \cdot h + a$  (bzw.  $2 \cdot h + 2 \cdot a \leq z \leq 3 \cdot h + 2 \cdot a$ , usw.) eine Füllstandshöhe  $z$  der Grenzschicht 12 bestimmbar. Der für ein gegebenes Elektrodenpaar 5, 4 nützliche Meßbereich  $h + a \leq z \leq 2 \cdot h + a$  ist dadurch charakterisiert, daß die Grenzschicht 12 gerade die Elektrode 4 überstreicht und dort die dominante Doppelschichtkapazität  $C_{DS}$  variiert. Zwischen den Elektroden 5, 4 existiert hingegen ein Totbereich  $h \leq z \leq h + a$ . Für einen analog betriebenen Füllstandssensor sollen daher die absolute Elektrodenhöhe  $h$  möglichst groß und die relative Elektrodenhöhe  $h/a$  in einem Bereich mit hinreichend großem Signalhub  $2 \cdot C_o/C_e$  gemäß Fig. 5 gewählt sein. Dies bedeutet, daß  $h/a$  erfindungsgemäß größer als 1 und vorzugsweise kleiner als 12 gewählt ist. Ein Vorteil der Erfindung besteht somit darin, daß die Meßsonde 1, insbesondere die relative Elektrodenhöhe  $h/a$ , gleichzeitig für eine digitale und analoge Anzeige optimierbar ist.

Ein durchgehender analoger Meßbereich kann auch durch zwei unabhängige, zueinander versetzt angeordnete Meßsonden 1 mit überlappenden oder zumindest komplementären Meßbereichen realisiert sein. Im einfachsten Fall sind die Sonden 1 identisch und weisen wiederum ein Verhältnis von Elektrodenhöhe zu Elektrodenabstand  $h/a$  größer als 1 auf.

Aus Fig. 6 und den Gleichungen G1 und G2 ist ferner er-

sichtlich, daß die Elektrodenabdeckung 7 möglichst dünn sein soll, um eine große Doppelschichtkapazität  $C_{DS}$  und einen großen Signalhub  $2 \cdot C_o/C_e$  zu erhalten. Mit Vorteil sind die Dicken  $d_i$  der Abdeckungen 7 kleiner als ein Maximalwert  $d_e$  von 2,5 mm, bevorzugt kleiner als 1,5 mm und insbesondere kleiner als 1 mm. Die Abdeckung 7 wirkt als dielektrische Abschirmung für das E-Feld im Außenraum und behindert dadurch die Ausbildung der Doppelschichtkapazität  $C_{DS}$ . Mit Vorteil weist die Abdeckung 7 eine Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_e$  kleiner als 10 und insbesondere kleiner als 5 auf.

Die obigen Betrachtungen beziehen sich auf eine Grenzschicht 12 zwischen einem Ionenleiter bzw. Elektrolyten 10 und einem Isolator 11. Bei den Berechnungen wurde die Frequenz  $f$  der Kapazitätsmessung gleich null gesetzt. Die Resultate behalten jedoch ihre Gültigkeit, wenn die Kapazitätsmessung anstatt mit Gleichspannung mit Wechselspannung der Frequenz

$$f < \tau_1^{-1} \approx (K \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_0 \cdot \rho_1)^{-1} = f_1 \quad (G21)$$

durchgeführt wird. Die Grenzfrequenz  $f_1$  der dielektrischen Relaxation beträgt für Salzwasser typischerweise 1 GHz.

Die erfindungsgemäße Elektrodenoptimierung behält ebenfalls ihre Gültigkeit, wenn eine Grenzschicht 12 zwischen zwei leitfähigen Medien 10, 11 mit sehr unterschiedlichen spezifischen Widerständen  $\rho_1 \ll \rho_2$  geortet werden soll. Die durch die Grenzschicht 12 separierten Medien 10, 11 weisen dann gemäß Gleichung G21 unterschiedliche dielektrische Grenzfrequenzen  $f_1 = (K \cdot \epsilon_e \cdot \epsilon_0 \cdot \rho_1)^{-1}$  und  $f_2 = (K \cdot \epsilon_e \cdot \epsilon_0 \cdot \rho_2)^{-1}$  auf und die Frequenz der Kapazitätsmessung bzw. Meßfrequenz  $f$  kann zwischen den Grenzfrequenzen  $f_2$  und  $f_1$ , d. h. im Frequenzbereich

$$f_2 \ll f \ll f_1 \quad (G22)$$

gewählt sein. Das leitfähigere Medium 10 ist dann in der Lage, eine Doppelschichtkapazität  $C_{DS}$  zu bilden, wohingegen im weniger leitfähigen Medium 11 nur die geometrische Kapazität  $C_e$  wirksam ist. Für Öl 11 gilt  $f_2 \ll 1$  Hz.

Darüberhinaus ist die Elektrodenoptimierung und die Wahl einer Meßfrequenz gemäß Gleichung G21 oder G22 mit der Wahl der Meßfrequenz(en) nach Gleichung G18 oder G19 zur meßtechnischen Eliminierung eines leitfähigen Schmutzfilms 14 gut vereinbar. Im allgemeinen ist nämlich für die Medien 10, 11 und einen Schmutzfilm 14 eine kritische Frequenz  $f_c$  so gegeben oder wählbar, daß  $f_2 < f_c < f_1$  erfüllt ist. Insbesondere gilt praktisch immer

$$f_c/f_1 = (\rho_1/\rho_f) \cdot G^{-1} < 1, \quad (G23)$$

da typischerweise  $\rho_1 \leq \rho_f$  und  $G^{-1} = (2 \cdot d_e \cdot b)/h^2 \approx 10^{-2} \dots 10^{-3}$ . Dann ist eine Meßfrequenz im Frequenzbereich  $f_c < f < f_1$  wählbar, für welche der Schmutzfilm 14, aber nicht das leitfähige Medium 10 transparent ist. Zudem wird in völliger Übereinstimmung mit der erfindungsgemäßen Elektrodenoptimierung mit Vorteil die Elektrodenhöhe  $h$  groß und die Dicke  $d_e$  der Abdeckung 7 klein gewählt, um den Geometriefaktor  $G$  möglichst groß und die kritische Frequenz  $f_c$  des Schmutzfilms 14 möglichst klein zu machen.

Schließlich ist eine Optimierung der Elektrodenhöhe  $h$  auch mit der Variation der Abdeckungsdicke  $d_i$  und insbesondere mit einer radialen Versetzung der Elektroden 4, 5, 6, 13 zur Detektion eines isolierenden Schmutzfilms 14 verträglich. Auch können die Elektroden 4, 5, 6, 13 problemlos vertikal orientiert und großflächig gewählt werden, wodurch das Kapazitätsverhältnis  $C_o/C_e$  besonders groß wird. Zudem bestehen generell bezüglich des Querschnitts der Sonde 1

keine Einschränkungen. Gegebenenfalls sind in den Gleichungen geometrische Größen, wie z. B. die Elektrodenhöhe  $h$ , die Kondensatorflächen  $A_i$ , die Dicken  $d_i$  der Abdeckung 7 oder die Filmdicken  $b$ ,  $b_c$  und  $d_s$ , durch mittlere oder Effektivwerte zu ersetzen. Insbesondere sind die Gestalt der Elektroden 4, 5, 6, 13 nicht auf die erwähnte Rechteckform beschränkt. Die Elektroden 4, 5, 6, 13 dürfen im abgerollten Zustand auch eine Trapezform, Dreiecksform o. ä. aufweisen.

Das Rohr 2 besteht aus einem Dielektrikum wie Kunststoffe Plexiglas, PVC, Glas, Keramik oder dgl. Das Rohrinere 3 mit den Meßleitungen 8 und Ummantelungen 9 ist vorteilhafterweise mit einem Epoxydharz ausgegossen. Dies gewährleistet stabile Grundkapazitäten und macht die Sonde 1 hochdruckbeständig. Die Elektrodenabdeckung 7 besteht beispielsweise aus einem gießfähigen Überzug aus Epoxydharz oder aus Glas, einer Keramik, Glimmer o. ä. und ist insbesondere faserverstärkt. Bevorzugt besteht die Elektrodenabdeckung 7 aus einer ca. 0,5 mm ... 1 mm dünnen, stabilen Glasfaserrummantelung, die mit Epoxydharz überstrichen ist. Für eine gute mechanische Temperaturbeständigkeit der Sonde 1 werden bevorzugt Materialien mit ähnlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten verwendet. Insgesamt offenbart die Erfindung eine kapazitive Meßsonde 1, die sehr gut zur genauen Füllstandsmessung in Gegenwart beliebiger Schmutzfilme 14 geeignet.

#### Bezugszeichenliste

1 kapazitive Meßsonde, Meßstab	30
2 Rohr	
2b Mantelfläche	
3 Rohrinere	
4, 5, 6, 13 Elektroden	
5a, 5b segmentförmige Elektroden	35
7 Elektrodenabdeckung	
8 Meßleitungen	
9 Ummantelung	
10 Wasser, leitfähiges Medium, Medium mit dielektrischer Relaxationszeit $\tau_1$	40
11 Öl, isolierendes Medium, Medium mit dielektrischer Relaxationszeit $\tau_2$	
12 Grenzschicht	
14 Schmutzfilm	
15 Oberfläche der Meßsonde	45
a Elektrodenabstand	
h Elektrodenhöhe	
$d_e, d_1, d_2, d_j, d_{j+1}, d_{j+2}$ Dicke der Elektrodenabdeckung	
$d_s$ Dicke eines dielektrischen Schmutzfilms	
$b_c$ Dicke eines leitfähigen Schmutzfilms	50
f Frequenz der Kapazitätsmessung	
$f_1, f_2$ Grenzfrequenzen der dielektrischen Relaxation der Medien 10, 11	
$f_c$ Grenzfrequenz der dielektrischen Relaxation des Schmutzfilms	55
r Radius der Meßsonde	
z Füllstandshöhe, Ortskoordinate einer Grenzschicht	
$\Delta$ Meßungenauigkeit	
$\epsilon_0$ Influenzkonstante	
$\epsilon_M$ Dielektrizitätskonstante eines Mediums	60
$\epsilon_e$ Dielektrizitätskonstante der Elektrodenabdeckung	
$\epsilon_s$ Dielektrizitätskonstante des Schmutzfilms	
$\rho_f$ spezifischer Widerstand des Schmutzfilms	
$\rho_M$ spezifischer Widerstand eines Mediums	
$\tau, \tau_1, \tau_2$ dielektrische Relaxationszeitkonstanten eines Mediums	65
$\tau_f, \tau_0$ dielektrische Relaxationszeitkonstante des Schmutzfilms	

$\omega$  Kreisfrequenz der Kapazitätsmessung

$A, A_j, A_{j+1}$  Doppelschicht-Kondensatorflächen

B Sondenachse

$C_{DS}, C_{DS1}, C_{DS2}$  Doppelschichtkapazitäten

5  $C_{DSf}$  Doppelschichtkapazität eines leitfähigen Schmutzfilms

$C_e$  Elektrodenpaar-Kapazität für ein isolierendes Medium

$C_{\sigma}, C_{\sigma s}$  Elektrodenpaar-Kapazität für ein leitfähiges Medium

$C(z), C$  Gesamtkapazität, Elektrodenpaar-Kapazität

10 G Geometriefaktor

$R, R_{ij}, R_{jk}, R_{ik}$  Widerstände im leitfähigen Medium

#### Patentansprüche

1. Kapazitiver Füllstandssensor, insbesondere geeignet zur Ortsbestimmung einer Grenzschicht (12) zwischen Wasser (10) und Öl (11) in einem Separatortank, umfassend eine stabförmige Sonde (1) mit mehreren, entlang einer Sondenachse (B) angeordneten Elektroden (4, 5, 6, 13), welche mit elektrisch isolierenden Abdeckungen (7) versehen sind, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Abdeckungen (7) unterschiedliche Dicken ( $d_i$ ) aufweisen.

2. Kapazitiver Füllstandssensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß benachbarte Elektroden (13, 4; 4, 5; 5, 6) unterschiedliche Dicken und über-nächst benachbarte Elektroden (13, 5; 4, 6) gleiche Dicken der Abdeckung (7) aufweisen.

3. Kapazitiver Füllstandssensor nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß

a) die Elektroden (4, 5, 6, 13) gleiche Doppelschicht-Kondensatorflächen aufweisen und

b) eine effektive Dicke ( $d_e/\epsilon_s$ ) eines isolierenden Schmutzfilms (14) gemäß  $d_e/\epsilon_s = (d_i/\epsilon_e) \cdot [(C_{DSj} \cdot d_j)/(C_{DSi} \cdot d_i) - 1]/[1 - C_{DSj}/C_{DSi}]$  bestimmbar ist, wobei  $\epsilon_e$  = Dielektrizitätskonstante der Abdeckungen (7), und  $d_i, d_j$  = Dicken der Abdeckung (7) und  $C_{DSi}, C_{DSj}$  = Doppelschichtkapazitäten einer i-ten, j-ten Elektrode (4, 5).

4. Kapazitiver Füllstandssensor nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß

a) die Dicken ( $d_j$ ) kleiner als ein Maximalwert ( $d_e$ ) von 2,5 mm, bevorzugt 1,5 mm, insbesondere 1 mm, sind und

b) die Abdeckungen (7) eine Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon_e$ ) kleiner als 10, insbesondere kleiner als 5, aufweisen.

5. Kapazitiver Füllstandssensor nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß

a) für einen Schmutzfilm (14) des spezifischen Widerstands  $\rho_f$  eine maximal zulässige Dicke  $b_c$  und eine zugehörige kritische Frequenz  $f_c = 2 \cdot (\epsilon_e \cdot \epsilon_0 \cdot \rho_f)^{-1} \cdot (d_e/h^2) \cdot b_c$  vorgegeben ist, wobei  $h$  = Elektrodenhöhe, und

b) eine Meßfrequenz  $f > f_c$  gewählt ist oder zwei Meßfrequenzen  $f_a < f_c$  und  $f_b > f_c$  gewählt sind.

6. Kapazitiver Füllstandssensor nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß

a) die durch die Grenzschicht (12) separierten Medien (10, 11) unterschiedliche Grenzfrequenzen der dielektrischen Relaxation  $f_1, f_2$  aufweisen und

b) die mindestens eine Meßfrequenz  $f$  im Frequenzbereich  $f_2 < f < f_1$  gewählt ist.

7. Kapazitiver Füllstandssensor nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß ein Verhältnis der Elektrodenhöhe ( $h$ ) zu einem Elektrodenabstand ( $a$ ) größer als eins gewählt ist.

8. Kapazitiver Füllstandssensor nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß
- a) das Verhältnis von Höhe (h) zu Abstand (a) der Elektroden (4, 5, 6, 13) im Bereich von 1 bis 6, vorzugsweise zwischen 1,5 und 4,5, insbesondere gleich 3, gewählt ist und
  - b) der Füllstandssensor für eine analoge und/oder digitale Anzeige ausgerüstet ist.
9. Kapazitiver Füllstandssensor nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß
- a) die Sonde (1) im wesentlichen aus einem zylindrischen Rohr (2) besteht, an dessen Mantelfläche (2b) die Elektroden (4, 5, 6, 13) aufgebracht sind und
  - b) das Rohrinne (3) gegenüber dem die Sonde (1) umgebenden Außenraum abgeschlossen ist.
10. Kapazitiver Füllstandssensor nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß
- a) das Rohr (2) kreiszylindrisch ist und
  - b) die Elektroden (4, 5, 6) ringförmig oder segmentförmig sind und insbesondere im abgerollten Zustand eine rechteckige Form aufweisen.
11. Kapazitiver Füllstandssensor nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß
- a) das Rohr (2b) aus einem Dielektrikum, insbesondere aus Kunststoff, Glas oder einer Keramik, besteht und
  - b) die Abdeckungen (7) der Elektroden aus Epoxydharz, Glas, einer Keramik oder Glimmer bestehen und insbesondere faserverstärkt sind.

---

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

---

35

40

45

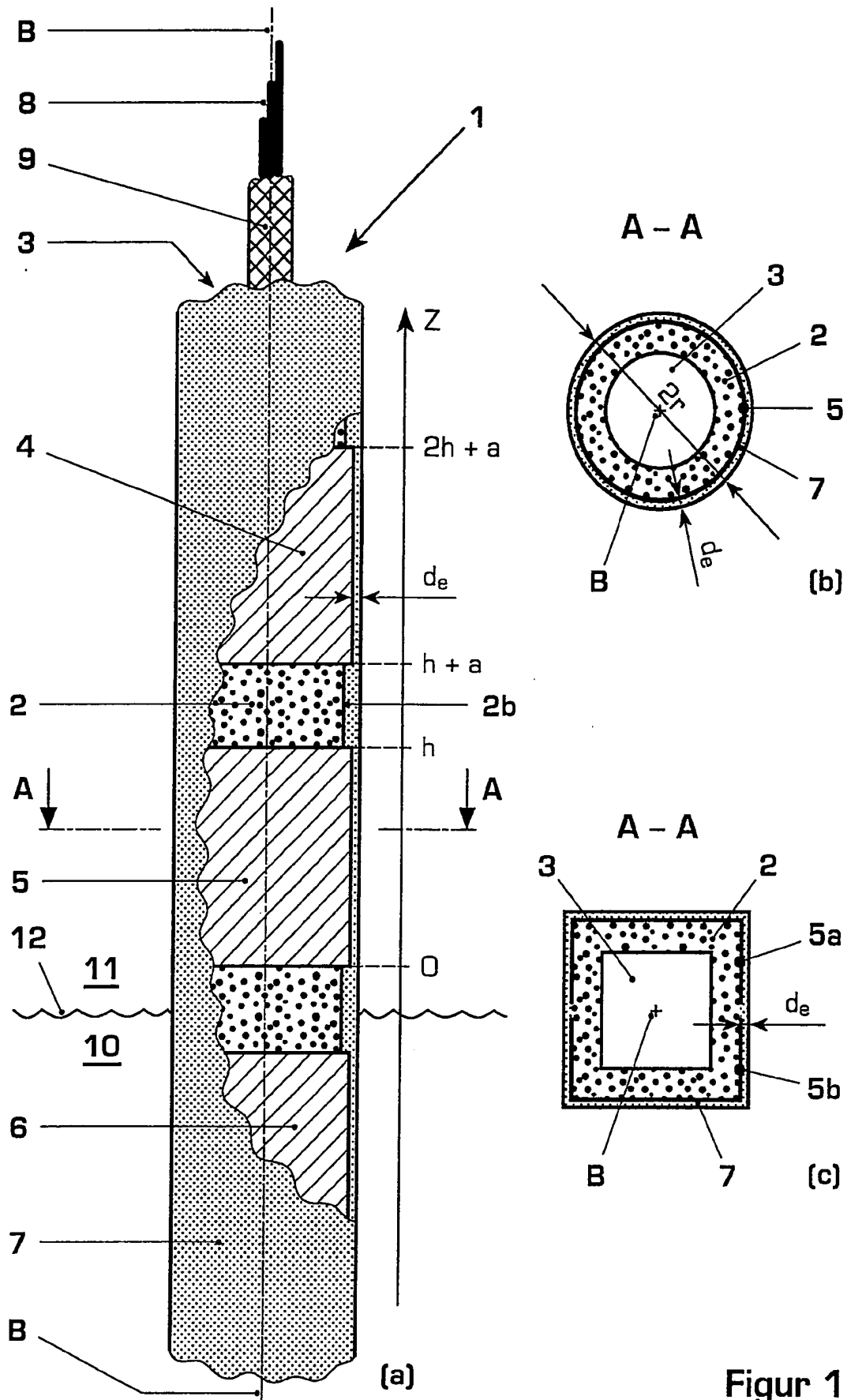
50

55

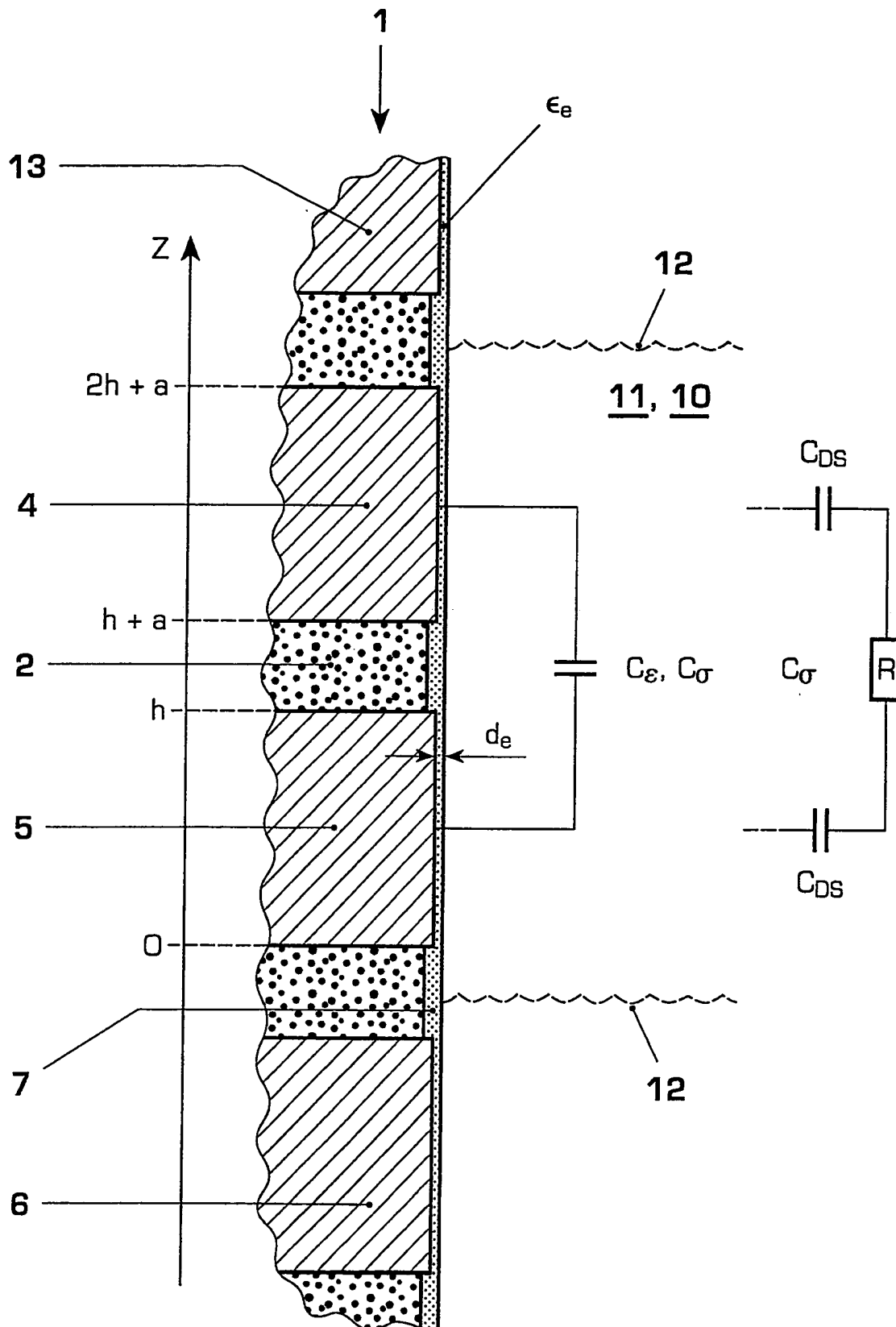
60

65

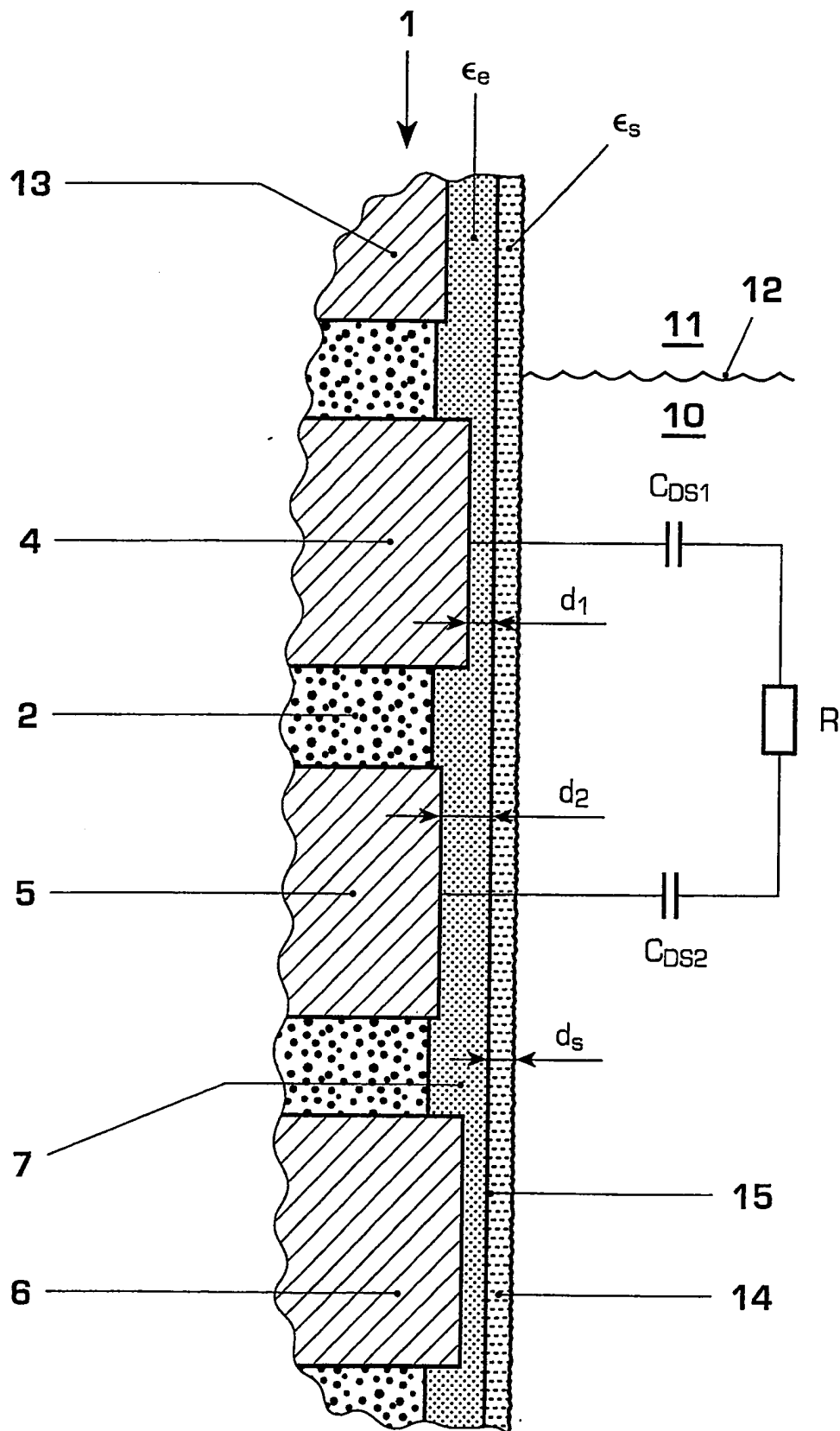
- Leerseite -



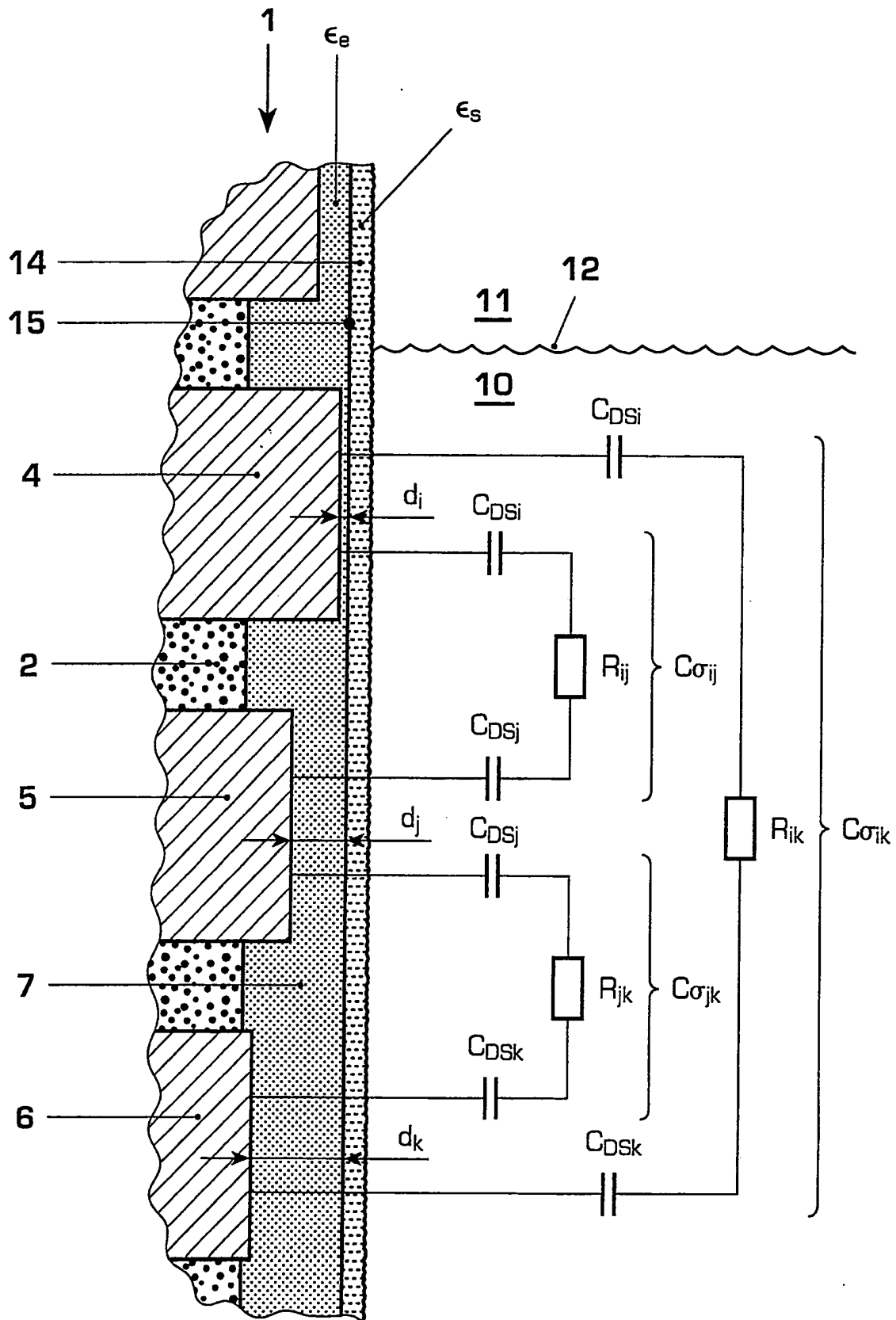
Figur 1



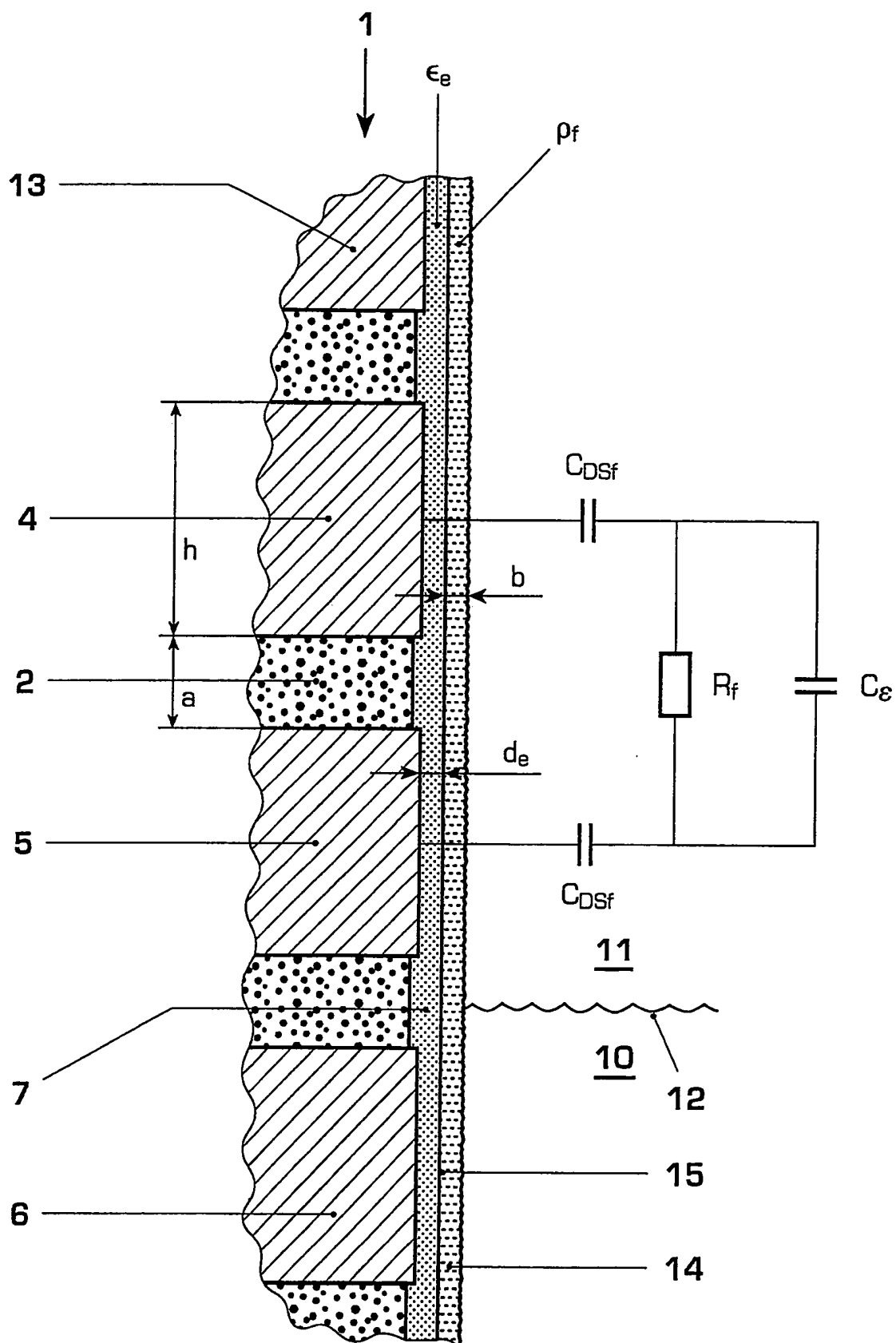
Figur 2



Figur 3a



Figur 3b



Figur 4

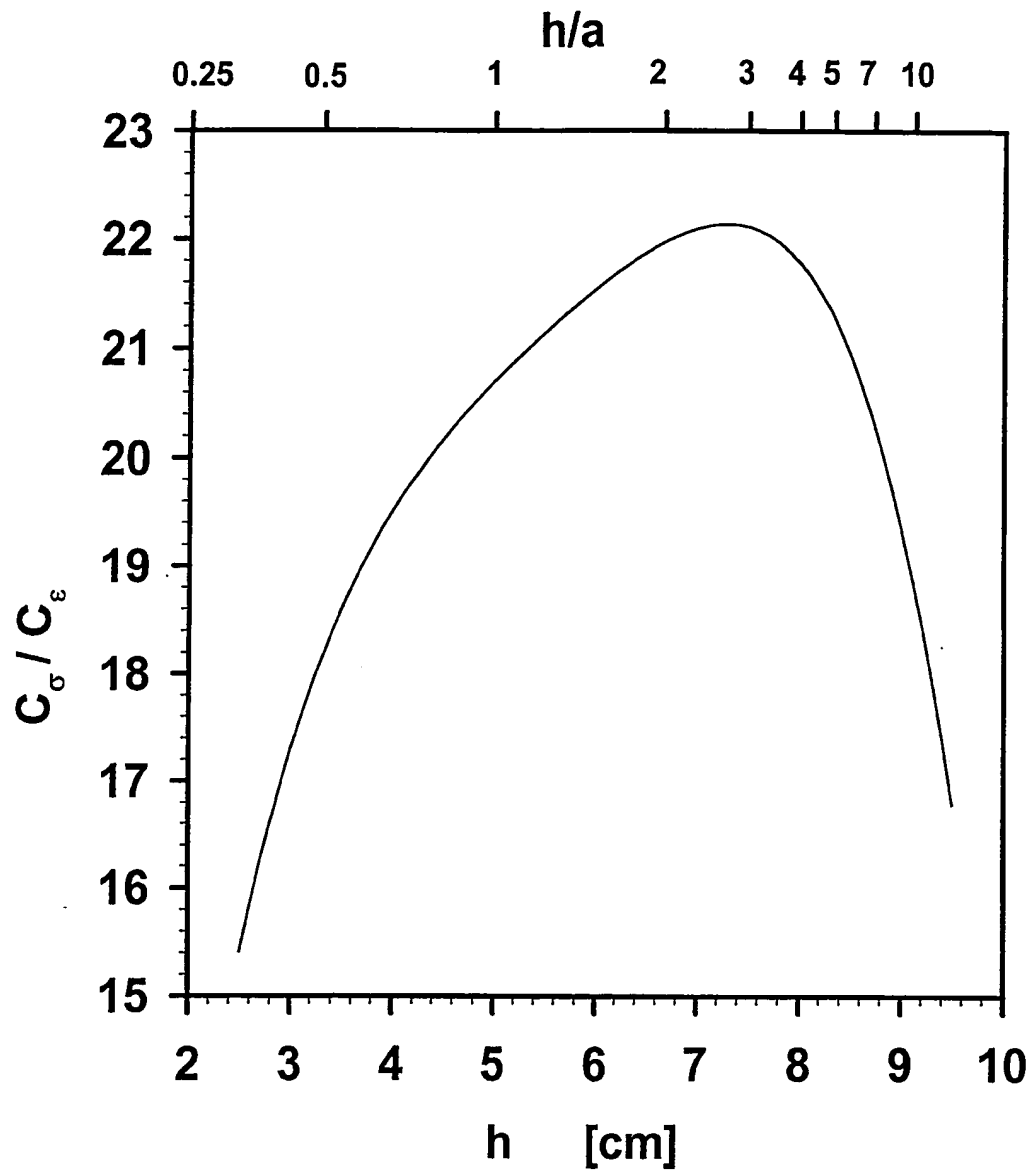


Fig. 5

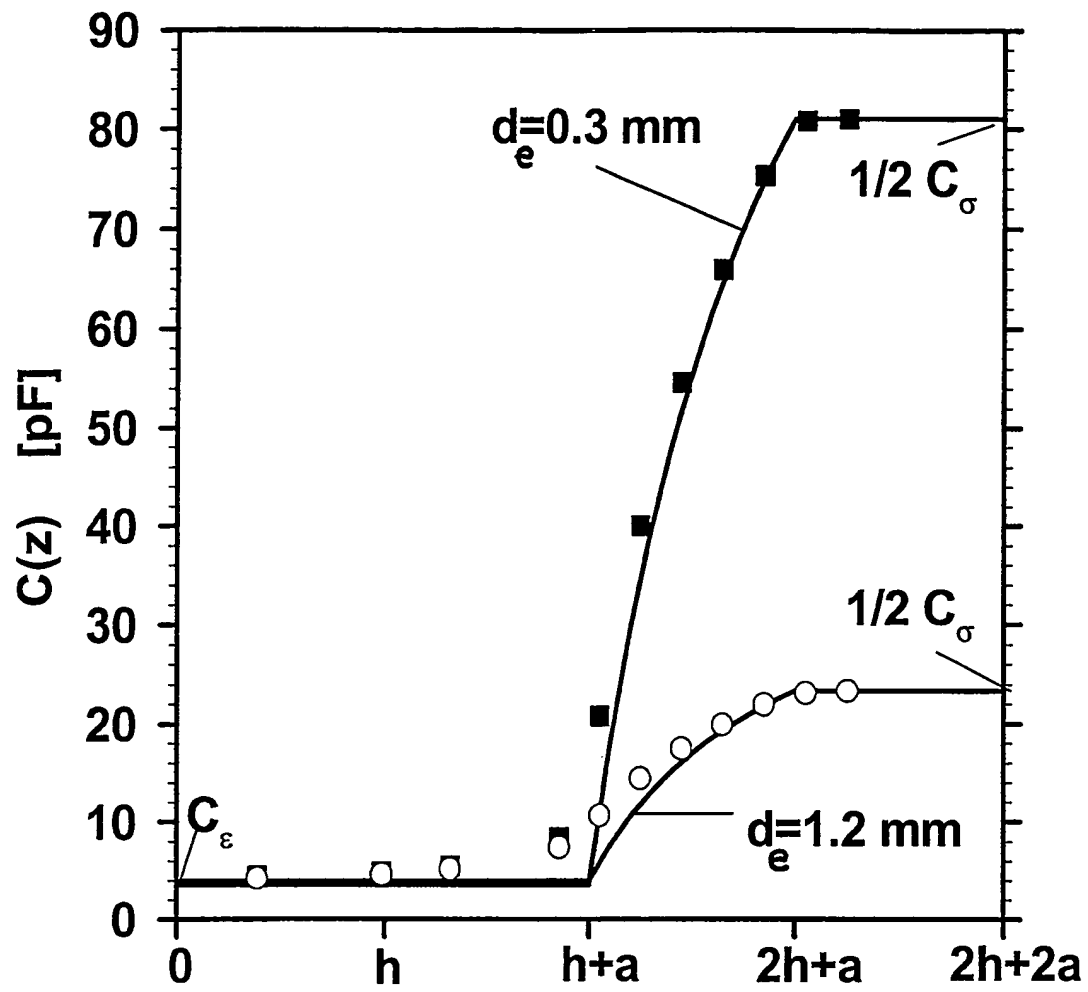


Fig. 6